

MOVIMIENTOS DE LADERA INDUCIDOS POR TERREMOTOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

José DELGADO¹, Fernando S.F. MARQUES², Teresa G. VAZ³, Investigadores Inestabilidades sismo-inducidas¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente
Facultad de Ciencias
Universidad de Alicante

² Departamento e Centro de Geologia
Faculdade de Ciências
Universidade de Lisboa

³ Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
Universidade de Lisboa
Lisboa

RESUMEN

La ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos es conocida en España y Portugal desde épocas remotas. Durante las últimas décadas, varios grupos de investigación han realizado estudios al respecto que han permitido recopilar información sobre este fenómeno. En este trabajo se realiza una revisión de las aportaciones realizadas y se presenta una base de datos elaborada a partir de tales contribuciones, la cual contiene eventos desencadenantes e inestabilidades asociadas ocurridos en la Península Ibérica y territorios insulares de España y Portugal. A partir de ella se

¹ Investigadores inestabilidades sismo-inducidas: Pedro ALFARO (UA), José M. AZANÓN (UGR), Daniel CLAVERO (UGR), Sara FIGUERAS (IGC), Julián GARCÍA-MAYORDOMO (IGME), Francisco J. GARCÍA-TORTOSA (UJA), Jesús GARRIDO (UGR), Luis HERNÁNDEZ (COPTPT-GC), Luca LENTI (IFSTTAR), Juan A. LÓPEZ (IES J.Arcas), Carlos LÓPEZ-CASADO (UGR), Albert MACAU (IGC), Salvatore MARTINO (ULS), Joaquín MULAS (IGME), José A. PELÁEZ (UJA), Martín J. RODRÍGUEZ-PECES (UCM), Juan C. SANTAMARTA (ULL), Eugenio SANZ (UPM), Pablo G. SILVA (USAL), J. L. ZÉZERE (UL)

analizan las características de las inestabilidades inducidas, considerando su tipología y las distancias de ocurrencia en función de la magnitud de los eventos desencadenantes. Los datos constituyen una base para futuros estudios de riesgos asociados a este fenómeno.

1. INTRODUCCIÓN

Los terremotos constituyen un efectivo agente desencadenante de inestabilidades de ladera. Frecuentemente, estas inestabilidades sismo-inducidas causan graves daños a la sociedad (edificios, estructuras e infraestructuras; Bird y Bommer, 2004). Desgraciadamente, el efecto de las inestabilidades sismo-inducidas como agente causante de daños tiende a ser minusvalorado, siendo atribuidas sus consecuencias en muchos casos a la propia sacudida.

Si bien la ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos en la Península Ibérica está documentada desde muy antiguo, su estudio es relativamente reciente tanto en España como en Portugal, a diferencia de los estudios de movimientos de ladera inducidos por otras causas (lluvia, erosión, etc.). En el presente trabajo presentamos una revisión de las contribuciones realizadas por los diversos grupos que han estudiado esta problemática y publicado sus logros, poniendo especial énfasis en el inventario de inestabilidades de ladera que ha resultado a partir de dichas contribuciones.

2. LÍNEAS DESARROLLADAS

El estudio de los movimientos de ladera sismo-inducidos se ha efectuado desde cuatro aproximaciones básicas: (1) en el marco de estudios de Tectónica Activa, (2) realización de inventarios asociados a eventos concretos, (3) elaboración de mapas previsores, y (4) análisis de inestabilidades concretas. No obstante, la relación existente entre las líneas de trabajo hace que muchos trabajos puedan asignarse a varias líneas a la vez.

En los estudios de Tectónica Activa no es frecuente que se reconozcan o caractericen inestabilidades: el tiempo transcurrido desde el episodio de actividad de la falla en cuestión hasta la actualidad es tal que muchas de las inestabilidades reconocibles pueden atribuirse a múltiples causas, siendo difícil su asignación a un paleoevento concreto. Igualmente, existen dudas acerca de la posible magnitud del evento causante. Como consecuencia, existen incertidumbres inherentes a algunos resultados obtenidos; así, el estudio de una ladera inestable en el valle inferior del río Tajo permitió a Fonseca et al. (2000) y a Vilanova y Fonseca (2004) deducir la existencia de una falla activa. Sin embargo, Cabral y Marques (2001) y Cabral et al. (2011) señalaron que dicha ladera ya era inestable en condiciones estáticas, aunque no pudiera descartarse un origen sísmico.

Tan sólo en el caso de estudios realizados sobre fallas con actividad en épocas históricas (recientes) se han podido identificar y asociar inestabilidades a terremotos. Tal es el caso de los estudios sobre la falla de Sencelles, Mallorca (Silva et al., 2001) o del terremoto de Carmona de 1504 (Vollmert et al., 2011). Así, la documentación recopilada durante el estudio de la falla de Sencelles permitió localizar varios desprendimientos causados por el denominado terremoto de Palma de 1851 (Io = VII).

A partir de esta información se está procediendo a la catalogación de los efectos geológicos de los terremotos en España mediante la aplicación de la Escala Macrosísmica de efectos Ambientales de los terremotos ESI-2007 (Michetti et al., 2007; Reicherter et al., 2009; INQUA, 2013). El catálogo preliminar incluye 32 movimientos de ladera sísmicamente inducidos: 6 grandes deslizamientos y 23 desprendimientos (Silva et al., 2008). Los datos analizados indican, en casi todos los casos, que las áreas macrosísmicas poseen una extensión alrededor de 80-100 km², pero los efectos geológicos relevantes (de mayores dimensiones) apenas llegan a afectar a áreas de 10 km², incluso aquellos relacionados con intensidades mayores o iguales a VII.

La segunda línea de trabajo desarrollada ha consistido en la identificación, clasificación y realización de inventarios de inestabilidades desencadenadas por eventos históricos o recientes. La rica documentación histórica disponible, tanto en España como en Portugal, ha permitido identificar inestabilidades asociadas a terremotos ocurridos en fechas tan tempranas como el año 382 b.C. Diversos documentos históricos mencionan la ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos (Moreira de Mendonça, 1758; Prado, 1863; Fernández Castro et al., 1885; Orueta, 1885; entre otros muchos). Frecuentemente esta documentación ha sido recopilada en el marco de estudios de sismicidad histórica, facilitando su posterior consulta (IGN, 1980; Vidal, 1986; Barata, 1989; Martínez Solares, 2001; Olivera et al., 2006; entre otros). A partir de esta información, diversos autores han elaborado, a su vez, catálogos de inestabilidades sismo-inducidas, tanto en España como en Portugal. Para eventos ocurridos en fechas recientes, los inventarios se han realizado a partir de la inspección *in situ* del territorio afectado. Estos trabajos han permitido identificar centenares de inestabilidades.

A partir de registros históricos, Zêzere et al. (2001) describen las inestabilidades de Costa do Castelo y de Santa Catarina, localidades afectadas por los terremotos de 1512 y 1597, respectivamente, procurando reconstruir sus características y tipologías. Marques (2004) estudió la relación directa entre sismos, erupciones y factores meteorológicos en la ocurrencia de inestabilidades en las islas Azores, enriqueciendo la base de datos de inestabilidades sismo-inducidas en la región. A partir del trabajo inicial de Zêzere et al. (2001), Vaz (2010) y Vaz y Zêzere (2011) identificaron 29 inestabilidades provocadas por la actividad sísmica en Portugal. La identificación del tipo de inestabilidad se basó en fotografías, datos históricos, arqueológicos, modelos digitales del terreno y trabajo *in situ*. No obstante, muchas veces no se pudieron clasificar debido a lo incompleto de los datos históricos. Para aquellos que sí se pudo

hacer correctamente, la mayoría de ellos correspondían a desprendimientos de rocas. Un resultado muy relevante de este trabajo fue encontrar diferencias significativas en la distribución espacial de las inestabilidades en Portugal en función del factor desencadenante: las inestabilidades desencadenadas por precipitaciones se concentraban esencialmente en el sector centro y norte del país, donde la energía del relieve es mayor, mientras que las sismo-inducidas ocurren mayoritariamente en el sur y centro de Portugal, siguiendo la distribución de las intensidades sísmicas máximas observadas en el periodo histórico e instrumental.

Delgado et al. (2011a) han elaborado un catálogo de inestabilidades sismo-inducidas en la Cordillera Bética a partir de documentación histórica, de la inspección/verificación sobre el terreno, así como de los inventarios realizados *in situ* de eventos recientes (1999 a 2005). Los datos recopilados señalan que las inestabilidades de tipo “disrupted” (*sensu* Keefer, 1984) son las más frecuentes, a semejanza de lo observado en Portugal (Vaz, 2010).

Las inestabilidades inducidas por eventos recientes (1999 hasta la actualidad) han sido inventariadas a partir de inspecciones *in situ*. Así, Mulas (1999) inventarió parte de las inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Mula (2/Feb/1999, Mw 4.7). De la misma forma, Alfaro et al. (2012a,b,c) han publicado el inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Lorca (11/May/2011, Mw 5.1) y Marques et al. (2007) hicieron lo propio con la serie sísmica de 2005 de Fogo-Congro (San Miguel, Azores). La principal limitación de estos estudios radica en la falta de material cartográfico post-terremoto, que sirva de apoyo para una rápida inspección regional e identificación de las inestabilidades de mayor tamaño, incluso para áreas remotas.

Una tercera línea de actuación desarrollada ha consistido en la elaboración de mapas previsores de inestabilidades sismo-inducidas. Peláez et al. (2005) elaboraron mapas de peligrosidad sísmica para el SE de la Península Ibérica en términos de Intensidad Arias (IA), parámetro de movimiento del suelo que tiene en cuenta no sólo la severidad de la sacudida, sino también el contenido en frecuencias y la duración del evento. Para representar los resultados utilizaron valores de 0.11, 0.32 y 0.54 m/s, valores umbral de IA para que ocurran inestabilidades de tipo desprendimiento, deslizamientos coherentes y extensiones laterales, respectivamente (Keefer y Wilson, 1989). El mapa de peligrosidad resultante, con un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno de 475 años), muestra que el sector central de la cordillera Bética y parte de la provincia de Alicante podrían verse afectados por desprendimientos. Sólo el sector de Granada y Campo de Dalías (Almería) registrarían valores de IA suficientemente altos como para ser esperables deslizamientos coherentes.

Hasta la fecha, la mayoría de los mapas previsores realizados se han basado en el método del bloque rígido deslizante o Newmark (Jibson, 1993, 2007; Jibson et al., 2000). En él se considera el estado de la ladera, calculando la denominada aceleración crítica (a_c) como la aceleración mínima necesaria para alcanzar un equilibrio estricto en la ladera (Factor de Seguridad = 1), y se compara con la acción sísmica (acelerogramas). Permite determinar la

probabilidad de rotura por acción sísmica en función del denominado desplazamiento de Newmark (DN), o desplazamiento acumulado resultante mientras la aceleración del terremoto excede el valor de la aceleración crítica de la ladera.

Coral Moncayo (2002) y Figueras et al. (2005) han estudiado laderas en el Principado de Andorra. Para tal fin, consideraron tres acelerogramas cuyo espectro se ajusta al resultante de un estudio de peligrosidad sísmica (periodo de retorno de 475 años, PGA 0.1g) y calcularon a_c para cada formación rocosa y diversos intervalos de pendiente. Sus resultados ponen de manifiesto que sólo aquellas laderas con pendiente superior a 40° pueden sufrir inestabilidad. De forma similar, Delgado et al. (2004a,b, 2006) han elaborado mapas de susceptibilidad en el valle del río Serpis (Alicante) definiendo diversas categorías de susceptibilidad a partir de la probabilidad de que a_c en cada punto sea inferior a 0.1g, valor que estiman debió afectar al entorno de Alcoy durante el terremoto de 1620. Los resultados obtenidos muestran una excelente correlación entre las zonas de susceptibilidad más alta y las inestabilidades desencadenadas por dicho terremoto.

Rodríguez-Peces (2008, 2010), García-Mayordomo et al. (2009) y Rodríguez-Peces et al. (2008, 2009a,b,c,d, 2011a) han aplicado extensivamente el método de Newmark para el estudio regional de sectores de Sierra Nevada (Granada) y Lorca (Murcia). Como novedad, estos autores consideran la aceleración pico resultante a partir tanto de análisis deterministas como probabilistas, incrementan dicha aceleración para tener en cuenta fenómenos de amplificación (estratigráfica y/o topográfica) y calculan DN a partir de las expresiones propuestas por Jibson (2007). Los resultados han sido comparados con inventarios de inestabilidades producidas por terremotos concretos así como por otras causas (lluvia, erosión, etc.), encontrando que la correlación entre ambos tipos de información es limitada, aunque los desplazamientos observados en las cabeceras de grandes deslizamientos sugiere que la sismicidad puede reactivar dichos deslizamientos. Adicionalmente, los valores de DN resultantes (~2 cm) sugieren que las inestabilidades que con mayor frecuencia se producirán serán desprendimientos y avalanchas rocosas de dimensiones reducidas y afectando a zonas también reducidas. Tan sólo para eventos de magnitud $M_w > 6.0$ es de esperar una amplia ocurrencia de estos fenómenos y la generación de deslizamientos de mayores dimensiones.

Mavrouli et al. (2009) han estudiado dos emplazamientos en Andorra (Solá de Santa Coloma), calculando el factor de seguridad según la expresión de Hoek y Bray (1981) para roturas planas. Consideraron, además, que el buzamiento de las discontinuidades a favor de las cuales podría producirse el movimiento variaba desde su buzamiento medio \pm desviación típica, que la aceleración sísmica en roca era 0.12g, la cual variaba por amplificación topográfica, y que la presión del agua en las discontinuidades podía variar entre el 0 (sin agua) y el 70%. Los resultados muestran que la zona tiene baja susceptibilidad a desprendimientos sismo-inducidos, y que estos sólo aumentarían de forma significativa cuando el agua rellene más del 50% de las discontinuidades.

Mulas et al. (2001, 2003) han realizado una zonación sísmica de diversos valles del Pirineo Central. Realizaron una clasificación del territorio a partir de una combinación (matriz) de parámetros específicos de la ladera (litología, pendiente, etc.) y de la acción sísmica (intensidad macrosísmica esperada en 475 años). Más recientemente, Mulas et al. (2010) han realizado un estudio comparativo de diversas técnicas para la elaboración de mapas previsores en las mismas zonas. De la comparativa realizada señalan tres elementos clave: (1) un conocimiento detallado de la acción sísmica, siendo muy interesante disponer de medidas *in situ* mediante acelerómetros, (2) los mapas deben realizarse para cada tipología de inestabilidad, pues los condicionantes (tanto estáticos como dinámicos) varían de una tipología a otra, y (3) considerar la variabilidad de las propiedades geotécnicas de los materiales.

La realización de mapas previsores se ha encontrado, hasta la fecha, con una limitación básica: la ausencia de inventarios completos de inestabilidades inducidas por terremotos concretos, que permitan una calibración de las diversas metodologías disponibles. Hasta hace poco tiempo este control se ha efectuado con pocas inestabilidades, lo que hace que ciertas incertidumbres sean inherentes a los resultados y mapas propuestos por cada autor. No obstante, los eventos de más reciente ocurrencia, para los que se disponen de inventarios quasi-completos, están permitiendo superar estas limitaciones. Así, Marques et al. (2007), utilizando las más de 250 inestabilidades desencadenadas por la serie sísmica de 2005 en Fogo-Congro (San Miguel, Azores), efectuaron un análisis de susceptibilidad a ocurrencia de inestabilidades a través de regresión, utilizando como variables la distribución espacial de las inestabilidades, la litología, la distancia al epicentro, la pendiente y la orientación de las vertientes. Este tipo de aproximación tiene gran importancia en el ámbito de la ordenación del territorio al permitir identificar las zonas de futura ocurrencia de inestabilidades.

Rodríguez-Peces et al. (2012) utilizaron un inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Lorca de 2011 (volumen $> 1 \text{ m}^3$) y un DEM de 4 m de resolución espacial en un análisis de Newmark. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la mayoría de las inestabilidades (desprendimientos en roca) ocurrieron en zonas donde DN fue inferior a 2 cm.

Finalmente, la última línea de investigación desarrollada ha consistido en la descripción y/o análisis dinámico de inestabilidades concretas en relación con terremotos. Para un correcto desarrollo, estos estudios requieren mucha información (geológica, geotécnica, sísmica), que pocas veces está disponible. Ello justifica que aún sean poco frecuentes.

Sanz (1992, 1997) estudió el deslizamiento de Güevéjar (Granada), recuperando información histórica acerca de su evolución post-terremoto, y demostró la importancia que tuvo el agua freática para su repetida reactivación por efecto sísmico (1755 y 1885). Posteriormente, Jiménez Pintor y Azor (2006) realizaron un modelo geológico de la inestabilidad.

García-Mayordomo (1998, 1999) analizó, aplicando el método de Newmark, la estabilidad de dos taludes tipo en Alcoy (Alicante), con pendientes y longitudes de $10^\circ/100 \text{ m}$ y $20^\circ/50 \text{ m}$,

respectivamente, obteniendo que sus aceleraciones críticas eran tan bajas como 0.04g.

Ferreira (2002) analizó el debris-flow de Vila Franca do Campo (Azores), desencadenado por un terremoto en 1522, que destruyó la ciudad y causó 5000 muertes. Marques et al. (2009), retomando el trabajo de este autor, estudiaron dicho flujo a través de documentos históricos, campañas arqueológicas y trabajo de campo, identificando el depósito y procediendo a su caracterización sedimentológica. A través de modelos numéricos simularon dicho flujo, permitiendo obtener una perspectiva más realista de las áreas que fueron afectadas.

Marques (2001, 2005, 2007) realizó un modelo geológico para el deslizamiento rotacional de "Praia do Telheiro", en la costa SW de Portugal, a unos 2 km al NNE del Cabo de S. Vicente y realizó análisis retrospectivos de estabilidad con métodos de equilibrio límite para roturas circulares que indicaran que el movimiento solo podría haber sido desencadenado por una fuerte acción sísmica. El análisis de fotografías aéreas antiguas (vuelo de 1947), mapas históricos y observaciones de terreno sugieren una edad del movimiento de algunos centenares de años, posiblemente causado por el sismo de Lisboa de 1755 (Mw 8,7), con localización precisa aún desconocida (Baptista et al., 1998, 2003, 2011, Gutscher et al., 2006).

Rodríguez-Peces (2008, 2010) y Rodríguez-Peces et al. (2008; 2011b,c,d) han aplicado también el método de Newmark para estudiar tanto pequeños desprendimientos (causados por los terremotos de Bullas, 2002, Mw 5.0, y La Paca, 2005, Mw 4.8) como grandes deslizamientos en la provincia de Granada (Güevéjar y Diezma). Estos estudios son muy interesantes por cuanto emplean el método de Newmark para realizar análisis retrospectivos y así estimar los parámetros desencadenantes de la inestabilidad, así como determinar la combinación "distancia epicentral máxima-magnitud" de los eventos reactivadores.

Sanz (2010) describe un deslizamiento en roca de grandes dimensiones en Peñón de Oeanilla (Sierra de Cabrejas, Cordillera Ibérica). A partir de un análisis retrospectivo comprueba que es necesario atribuir parámetros resistente al macizo excesivamente bajos para poder justificar su ocurrencia. Como consecuencia, considera que una acción sísmica pudo contribuir a su desencadenamiento. La proximidad de la inestabilidad a la falla de Oceanilla es congruente con esta hipótesis. Más recientemente, Mateos et al. (2012) han estudiado un deslizamiento profundo en la costa de la Sierra Tramuntana (Mallorca). Analizando posibles causas desencadenantes, determinan factible su origen sísmico.

Esteve (2011) ha estudiado el comportamiento dinámico del deslizamiento de El Molinar (Alcoy, Alicante) considerando un sismograma compatible con las características del evento que se supone lo activó en 1620. Los resultados indican que actualmente la respuesta dentro de la masa variaría por efecto de unos rellenos existentes en su cabecera, que amplificarían la respuesta en bajas frecuencias (< 3 Hz), y a altas frecuencias en el resto del cuerpo.

Alfaro et al. (2012d) han realizado un análisis numérico de las inestabilidades observadas en la

Rambla de los 17 Arcos durante el terremoto de Lorca de 2011. Sus resultados ponen de manifiesto el control que tiene el ángulo de incidencia de la acción sísmica, así como la propia interacción de ésta con la ladera, en la localización de las inestabilidades en campo cercano.

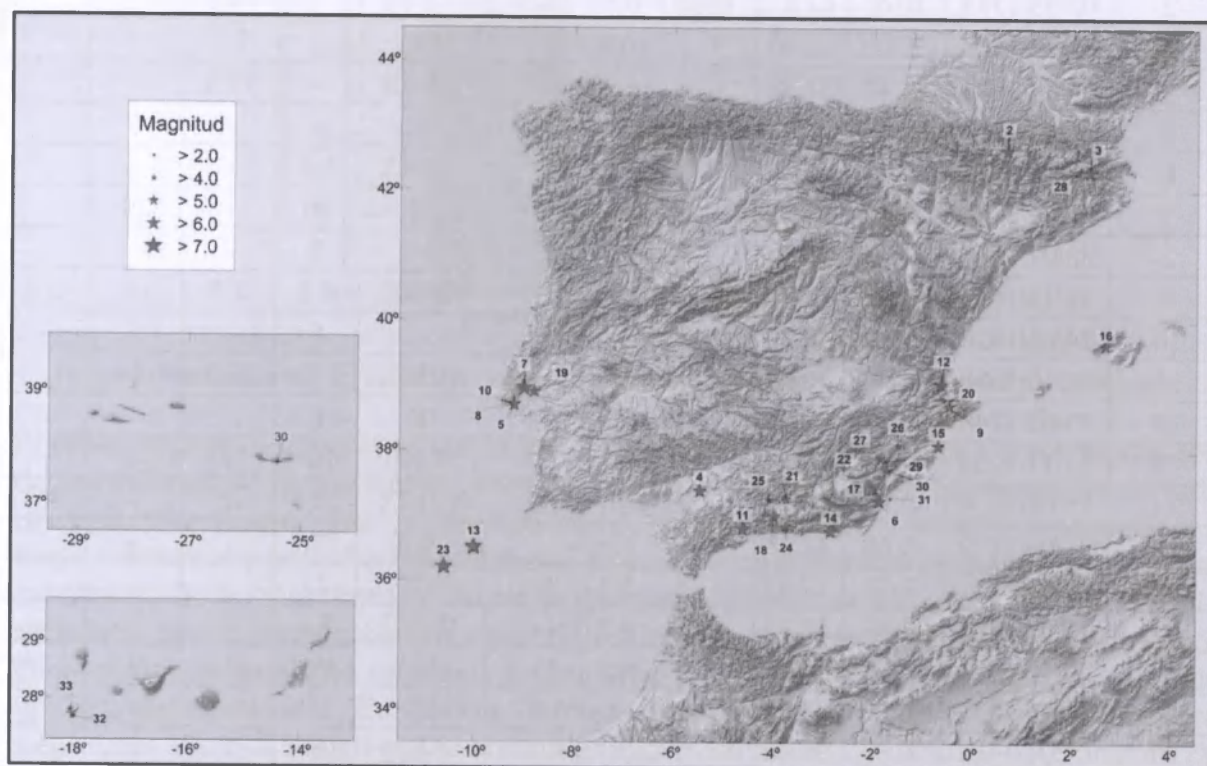


Figura 1 – Terremotos desencadenantes de movimientos de ladera en España y Portugal. El número hace referencia a la primera columna de la Tabla 1.

3. BASES DE DATOS DESARROLLADAS

A partir de los trabajos de Vaz (2010) y Delgado et al. (2011a), así como de la información recogida en los trabajos anteriormente mencionados, se ha elaborado un catálogo actualizado de terremotos e inestabilidades sismo-inducidas en la Península Ibérica (Tabla 1, Figura 1). El análisis de estos datos permite extraer información útil acerca del estado de dicho catálogo y de las propias inestabilidades. No obstante, las incertidumbres en la localización epicentral durante la época histórica limitan, como es evidente, las relaciones que se pudieran establecer entre inestabilidades y parámetros sísmicos. Es por ello que los resultados y conclusiones deben tomarse con precaución. En cambio, la información es cada vez más precisa con el tiempo, de manera que los eventos registrados a partir de 1999 se caracterizan por errores de localización epicentral pequeños (inferior a 3 km), y los inventarios realizados se pueden considerar prácticamente completos para inestabilidades de cierto volumen ($> 1\text{-}10\text{ m}^3$).

Evento	Fecha	Lon	Lat	Z	Magnitud Mw/Ms/otra	Imáx	Dist. máx. (km)			Area km ²
							Dis.	Coh.	Flow	
1	00/00/0382	-12.00	36.00	-	- / - / 7.5	-	584			
2	02/03/1373	0.68	42.63	16	6.5 / - / -	VIII-IX		74.5		
3	02/02/1428	2.33	42.30	9	6.5 / - / -	IX		9.1		
4	05/04/1504	-5.47	37.38	-	6.9 / - / -	VIII-IX	-	17.6	-	
5	28/01/1512	-9.20	38.70	-	- / - / 6.3	-	-	-	6	
6	09/11/1518	-1.87	37.23	-	6.1 / - / -	VIII-IX	1.4	-	-	
7	26/01/1531	-9.00	38.95	-	- / - / 7.1	IX	96	-	29	
8	22/07/1597	-9.20	38.70	-	- / - / 5.7	-	5	-	-	
9	02/12/1620	-0.47	38.70	-	5.5 / - / -	VII-VIII	0.3	1.3	-	3.6
10	24/06/1626	-9.20	38.70	-	- / - / 4.0	-	6	-	-	
11	09/10/1680	-4.60	36.80	-	6.8 / - / -	VIII-IX	-	23.2	-	
12	23/03/1748	-0.63	39.03	-	6.2 / - / -	IX	11.3	-	-	
13	01/11/1755	-10.00	36.50	-	8.7 / - / -	XI-XII	769	577	-	
14	25/08/1804	-2.83	36.77	-	6.4 / - / -	VIII-IX	32.5	26	-	857
15	21/03/1829	-0.68	38.08	-	6.6 / - / -	IX-X	38.7	-	-	
16	15/05/1851	2.67	39.63	-	5.2 / - / -	VII	23			
17	10/06/1863	-1.93	37.37	-	4.2 / - / -	VI-VII	8.5	-	-	66
18	25/12/1884	-3.98	37.00	-	6.5 / - / -	IX-X	35.8	45.4	39.4	3170
19	23/04/1909	-8.80	38.90	-	- / - / 6.0	IX	165	-	-	
20	07/01/1945	-0.58	38.80	-	4.8 / 4.8 / -	VII	15.4	-	-	
21	19/04/1956	-3.73	37.26	5	5.0 / 5.0 / -	VIII	4.8	-	-	
22	09/06/1964	-2.57	37.74	5	4.8 / 4.8 / -	VIII	8.4	2.3	-	34
23	28/02/1969	-10.60	36.20	22	- / - / 7.5	VII	222	-	-	
24	24/06/1984	-3.74	36.84	5	5.0 / 5.0 / -	V	10.4	13.6	-	104
25	24/10/1991	-4.07	37.25	5	- / - / 2.6	-	7.9			
26	02/02/1999	-1.50	38.10	1.1	4.7 / 4.7 / -	VI	19.8	8.8	-	185
27	06/08/2002	-1.84	37.90	1.2	5.0 / 4.8 / -	V	4.2	-	-	3.5
28	21/09/2004	2.16	42.34	3	- / - / 4.0	V-VI	5	-	-	
29	29/01/2005	-1.76	37.85	10.9	4.8 / 4.7 / -	VI	16.3	-	-	18
30	10/05/2005	-25.43	37.74	4	- / - / 3.9	VI	6	-	-	10
31	11/05/2011	-1.71	37.72	4	5.1 / - / -	VII	9.6	4.3	-	104
32	29/08/2011	-1.65	37.28	3	- / - / 2.7	III	13.9	-	-	
33	08/10/2011	-18.02	27.65	12	4.0 / - / 4.4	V	4.5			
34	11/11/2011	-18.05	27.78	21	- / - / 4.6	IV-V	7			

Tabla 1. Características de los eventos desencadenantes de inestabilidades y distancias máximas observadas para cada tipología (*sensu* Keefer, 1984).

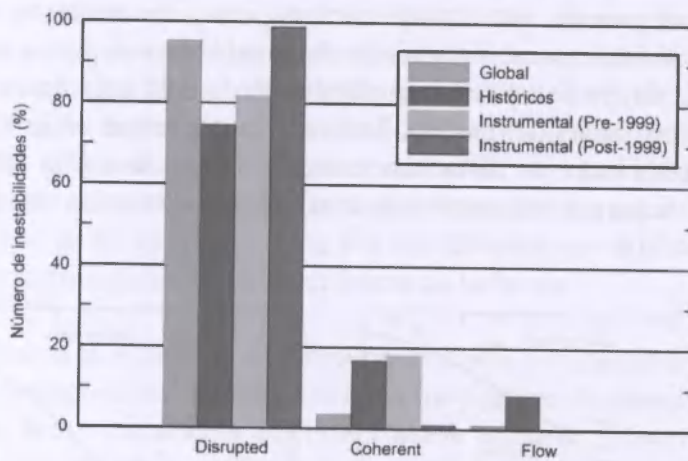


Figura 2. Frecuencia por tipología y periodo temporal de inestabilidades desencadenadas por terremotos.

El primer aspecto a destacar es que la gran mayoría de las inestabilidades sismoinducidas son de tipo “disrupted” (*sensu* Keefer, 1984). La Figura 2 presenta la frecuencia relativa de cada tipología identificada. Las inestabilidades de tipo “disrupted” suelen corresponder a desprendimientos y pequeños deslizamientos en suelos/roca que se desorganizan al progresar el movimiento de la masa. Pueden ocurrir incluso para pequeñas excitaciones ($M \sim 2.6$, Tabla 1) en laderas que se encontraban en equilibrio estricto en el momento de ocurrir el terremoto. Para eventos de magnitud moderada a baja ($M_w < 5.5$) prácticamente constituyen la única tipología desencadenada. En cambio, la proporción de las otras tipologías aumenta para magnitudes $M_w > 5.5$ (algo que se observa en el periodo histórico, anterior a 1920; Figura 2). Ello es debido a que el movimiento del suelo durante estos eventos tiene una duración y amplitud mayor, así como un contenido apropiado de bajas frecuencias, que es capaz de excitar las grandes masas de estas inestabilidades y ponerlas en movimiento.

Considerando las distancias epicentrales máximas de ocurrencia de las inestabilidades en función de la magnitud del evento (Figura 3), se observa un comportamiento dispar en función de la magnitud de los eventos. Así, las distancias máximas observadas para inestabilidades inducidas por eventos de magnitud $M_w > 5.5$ se caracterizan por encontrarse, en su inmensa mayoría, a distancias inferiores a los valores máximos propuestos por Keefer (1984). Las excepciones proceden de los eventos 1, 13 y 19, todos ellos históricos, donde el error de localización epicentral es elevado y, en consecuencia, también lo son las distancias epicentrales calculadas. Adicionalmente, por lo elevado de la magnitud de alguno de estos eventos, tal vez el uso de distancias epicentrales no sea correcto, siendo más apropiado el uso de las distancias respecto de la ruptura.

Para magnitudes $M_w < 5.0$, sin embargo, la mayoría de las distancias máximas observadas superan las distancias máximas propuestas por Keefer (1984), constituyendo *outliers sensu* Delgado et al. (2011b). En este caso, y como quiera que la mayoría de estos eventos han

tenido lugar durante el periodo instrumental reciente, estas distancias no pueden atribuirse a errores en la localización epicentral. También es remarcable en esta figura que para magnitudes $M_w \leq 5.0$, la mayoría de los datos representados proceden del área de estudio, siendo pocos los procedentes de otras partes del mundo. Teniendo presente que entre los datos usados por Keefer (1984) para establecer las distancias máximas propuestas sólo había tres eventos de magnitud inferior a 5.5, parece razonable que se revisen las distancias máximas en dicho rango de magnitudes ($M_w < 5.0$).

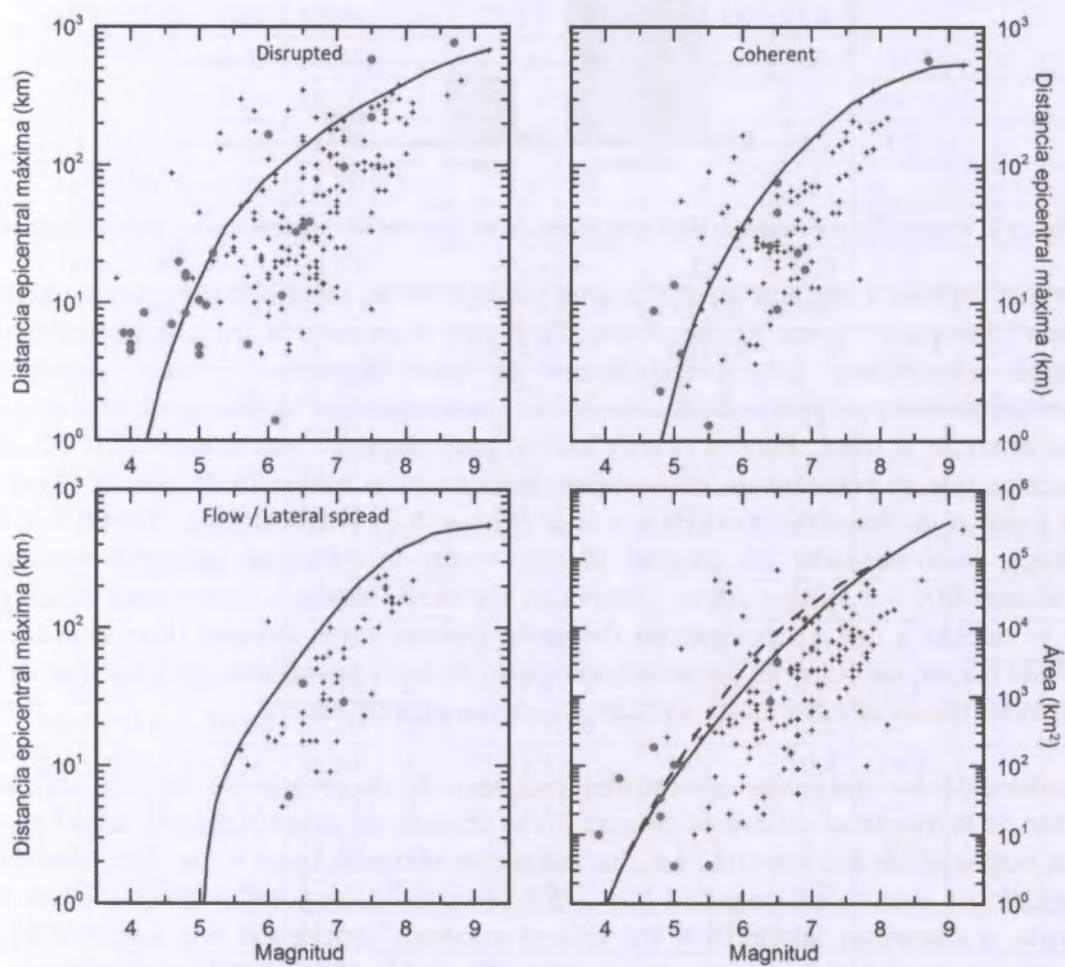


Figura 3. Distancias epicentrales máximas observadas y área de afección en función de la magnitud del terremoto. Círculos: datos Tabla 1; Cruces: datos del resto del mundo (Delgado et al., 2011b); Línea continua: distancias epicentrales/áreas máximas de ocurrencia de inestabilidades (Keefer, 1984); Línea discontinua: áreas máximas de ocurrencia de inestabilidades (Rodríguez et al., 1999).

Otro aspecto significativo de la Figura 3 es que para magnitudes moderadas a altas (e.g. $M_w > 6.0$), las distancias epicentrales máximas observadas para inestabilidades de tipo “coherent” son, en ocasiones, mayores que las observadas para la tipología “disrupted”, lo cual es

contradictorio (se requiere más energía para poner en movimiento una gran masa - deslizamiento coherente- que un bloque suelto de suelo o roca). Incluso hay eventos para los cuales sólo hay información sobre inestabilidades de tipo “coherent”, incluso a grandes distancias (Tabla 1). Este hecho pone de relieve que el catálogo recopilado es incompleto, faltando información sobre desprendimientos para estos eventos (históricos en todos los casos), pero también demuestra que las inestabilidades reconocidas debieron causar un impacto notable en la sociedad de su momento (bien por sus dimensiones o por los daños causados), que explica que quedaran registradas en las crónicas de la época.

Finalmente, atendiendo a la superficie de territorio afectada por inestabilidades (Figura 3), son muy pocos los datos disponibles todavía. Mientras los eventos de mayor magnitud/intensidad se caracterizan por áreas claramente inferiores a los máximos observados/propuestos por Keefer (1984) y Rodríguez et al., (1999), para magnitudes bajas ($M_w < 5.0$) estas áreas son elevadas, próximas o incluso superiores a los valores máximos observados a nivel mundial (Keefer, 1984). Es también llamativo que pese a las grandes distancias epicentrales observadas, el área afectada es proporcionalmente baja. Ello es debido a que varios de los eventos que desencadenaron inestabilidades a grandes distancias (*outliers*) tenían su epicentro fuera de las zonas afectadas por inestabilidades, lo que incrementa las distancias, pero no las áreas (Delgado et al., 2011a).

4. CONCLUSIONES

La información presentada permite llegar a las siguientes conclusiones:

- El estudio sistemático de inestabilidades sismo-inducidas es una línea aún reciente, tanto en España como en Portugal.
- Se pueden diferenciar cuatro líneas básicas de trabajo, interrelacionadas entre sí: estudios de Tectónica Activa, realización de inventarios, elaboración de mapas previsores y estudio de inestabilidades singulares, tanto históricas como actuales.
- Los datos aportados por diversos trabajos han permitido elaborar una base de datos de terremotos desencadenantes (34) y sus correspondientes inestabilidades (>650). La base de datos sólo puede considerarse completa para eventos posteriores a 1999, mientras que es tanto más incompleta cuanto más antiguo es el evento.
- Los datos actualmente disponibles indican que las inestabilidades de tipo “disrupted” son las más frecuentes, siendo casi las únicas reconocidas para eventos de magnitud $M_w < 5.5$; en cambio, las inestabilidades de tipo “coherent” sólo se reconocen con cierta frecuencia para eventos de magnitud $M_w > 5.5$.
- Las distancias máximas de ocurrencia de inestabilidades de tipo disrupted y coherent son, proporcionalmente, grandes para eventos de magnitud $M_w < 5.0$, siendo muchas de ellas mayores que las distancias máximas recogidas en la literatura.
- El área afectada por inestabilidades es relativamente pequeña para los pocos eventos

disponibles de magnitud moderada a alta. En cambio, es próxima a los valores máximos observados a nivel mundial para eventos de magnitud baja ($M_w < 5.0$).

Estas conclusiones nos permiten, además, definir líneas futuras de actuación:

- La primera, y básica, sería poder mejorar la calidad del catálogo y de la base de datos disponibles. Los grandes terremotos que han afectado a nuestro territorio han ocurrido siempre en el pasado, por ello, mejorar el conocimiento histórico es fundamental. En este sentido, estudiar eventos relativamente recientes, de los cuales existe incluso información instrumental disponible, como el de febrero de 1969 ($m_B = 7.5$), deben ser una importante aspiración.
- Es importante también continuar en la labor de estudiar inestabilidades aisladas y su posible relación con terremotos.
- Por su relevancia histórica, es necesario estudiar el comportamiento dinámico de grandes inestabilidades pre-existentes, así como determinar criterios objetivos (cuantitativos) que permitan determinar cómo y cuándo pueden reactivarse bajo acción sísmica.
- Profundizar en la relación entre los parámetros sísmicos y la ocurrencia de inestabilidades sismo-inducidas para mejorar la elaboración de mapas previsores.
- Los inventarios de inestabilidades sismo-inducidas, tanto de terremotos históricos como futuros, deben ser la base para ejercicios de auto-evaluación de las metodologías de realización de mapas previsores.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CGL2011-30153-C02-02 y por el grupo de investigación VIGROB-184 (Universidad de Alicante).

REFERENCIAS

- Alfaro, P., Delgado, J., García-Tortosa, F.J., Lenti, L., López, A., López-Casado, C. and Martino, S., 2012a. Widespread landslides induced by the Mw 5.1 Lorca, SE Spain, earthquake of 11 May 2011. *Engineering Geology*, 137-138: 40-52.
- Alfaro, P., Delgado, J., García-Tortosa, F.J., Lenti, L., López, A., López-Casado, C. and Martino, S., 2012b. Landslides induced by the May 11 (2011), Lorca (SE Spain), earthquake (Mw 5.1). *Proc. ESC-ISL*, Banf, 5 p.
- Alfaro, P., Delgado, J., García-Tortosa, F.J., Lenti, L., López, A., López-Casado, C. and Martino, S., 2012c. Movimientos de ladera inducidos por el terremoto de Lorca. *Proc. VII Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, San Sebastián, 6 p.
- Alfaro, P., Delgado, J., García-Tortosa, F.J., Giner, J.J., Lenti, L., López-Casado, C., Martino, S. and

- Scarascia-Mugnozza, G., 2012d. The role of near-field interaction between seismic waves and slope on the triggering of a rockslide at Lorca (SE Spain). *Natural Hazards and Earth System Science*, 12: 3631-3643.
- Baptista, M.A., Miranda, P.M.A., Miranda, J.M. and Mendes, V.L., 1998. Constrains on the source of the 1755 Lisbon tsunami inferred from numerical modelling of historical data on the source of the 1755 Lisbon tsunami. *Journal of Geodynamics*, 25(1-2): 159-74.
- Baptista, M.A., Miranda, J.M., Chierici, F. and Zitellini, N., 2003. New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 333-340.
- Baptista, M. A., Miranda, J. M., Omira, R. and Antunes, C., 2011. Potential inundation of Lisbon downtown by a 1755-like tsunami. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 3319–3326.
- Barata, M.R., Braga, M.L., Wagner, M., Guerra, B., Alves, J. and Neto, J., 1989. *Sismicidade de Portugal - Estudo da Documentação dos Séculos XVII e XVIII*. Vol II, Ministério do Planeamento e da Administração do Território, Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, Gabinete de Protecção e Segurança Nuclear. Lisboa.
- Bird, J.F. and Bommer, J.J., 2004. Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75: 147-279.
- Cabral, J. and Marques, F., 2001. Paleoseismological studies in Portugal: Holocene thrusting or landslide activity? *EOS Transactions*, 82 (32): 351-352.
- Cabral, J., Marques, F., Figueiredo, P. and Matias, L., 2011. Active surface faulting or landsliding in the Lower Tagus Valley (Portugal)? A solved controversy concerning the Vila Chã de Ourique site. *Journal of Seismology*, 15(2): 215-234.
- Coral Mocayo, H., 2002. Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., López Casado, C., Estévez, A., Doménech, C. y Cuenca, A., 2004a. Incertidumbres en la determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante). En: C. Conesa García, Y. Álvarez Rigel y J.B. Martínez-Guevara (Eds.): *Medio ambiente, recursos y riesgos naturales. Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección*, Murcia, II: 165-175.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech, C., Cuenca, A. y Henares, J., 2004b. Susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante) y sectores adyacentes. *Geotemas*, 6: 285-288.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech, C. y Cuenca, A., 2006. Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19(3-4): 197-218.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomas, R., García-Tortosa, F.J., Alfaro, P. and López-Casado, C., 2011a. Seismically-induced landslides in the Betic Cordillera (S Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31: 1203–1211.
- Delgado, J., Garrido, J., López-Casado, C., Martino, S. and Peláez, J.A., 2011b. On far field occurrence of seismically induced landslides. *Engineering Geology*, 123: 204-213.
- Esteve, C., 2011. Análisis dinámico del deslizamiento de El Molinar (Alcoy). Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Alicante.
- Fernández Castro, M., Lasala, J.P., Cortázar, D. y Gonzalo y Tarín, J., 1885. *Terremoto de Andalucía:*

- Informe de la Comisión nombrada para su estudio dando cuenta del estado de los trabajos en 7 de marzo de 1885.* Imp. M. Tello, Madrid.
- Ferreira, A.B., Zêzere, J.L. and Rodrigues, M.L., 2002. Historical Seismicity and Landslides in Portugal. Examples from the 16th Century. In: D. Delahaye, O. Maquaire (Eds.): *Geomorphology: from Expert Opinion to Modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet*, Rouen, pp. 105-114.
- Figueras, S., Macau, A., Goula, X. y González, M., 2005. Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra. *VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*, Valencia, 3: 12.
- Fonseca, F., Bosi, V., Vilanova, S.P. and Meghraoui, M., 2000. Investigations unveil Holocene thrusting for onshore Portugal. *EOS Transactions*, 81: 412-413.
- García-Mayordomo, J., 1998. Riesgo Sísmico en la Cuenca de Alcoy (Alicante). Aproximación a una Zonificación Sísmica. Tesis del Máster, Universidad Complutense de Madrid.
- García-Mayordomo, J., 1999. Zonificación Sísmica de la Cuenca de Alcoy mediante un Sistema de Información Geográfico. *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia, Ib: 443-450.
- García-Mayordomo, J., Rodríguez Peces, M.J., Azañón, J.M. and Insua-Arévalo, J.M., 2009. Advances and trends on earthquake-triggered landslide research in Spain. *1st INQUA-IGCP-567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology*, Baelo Claudia, 4 p.
- Gutscher, M.A., Baptista, M.A. and Miranda, J.M., 2006. The Gibraltar arc seismogenic zone (part 2): constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modeling and seismic intensity. *Tectonophysics*, 426: 153-66.
- IGN, 1980. *El terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884*. Publicaciones IGN, Madrid.
- INQUA, 2013. www.eecatalog.sinanet.apat.it/terremoti/index.php.
- Hoek, E.T. and Bray, J.W. 1981. *Rock slope engineering*. Institute of Mining and Metallurgy. London.
- Jibson, R.W., 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation Research Record*, 1411: 9-17.
- Jibson, R.W., 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91, 209-218.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58: 271-289.
- Jiménez Pintor, J. y Azor, A., 2006. El Deslizamiento de Güevéjar (provincia de Granada): un caso de inestabilidad de laderas inducida por sismos. *Geogaceta*, 40: 287-290.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 406-421.
- Keefer, D.K. and Wilson, R.C., 1989. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. In: P.M. Sadler and Morton, D.M. (eds.): *Landslides in a semi-arid environment*. Inland Geological Society, 2: 118-149.
- Marques, F., 2001. The deep seated landslide of Praia do Telheiro (SW coast of Algarve, Portugal). *Comunicações do IGM*, 88: 185-201.
- Marques, F., 2005. The "Praia do Telheiro" landslide: a 1755 Lisbon earthquake triggered slope instability? *International conference 250th Anniversary of the Lisbon Earthquake*: 399-403.
- Marques F., 2007. The seismically triggered deep-seated landslide of Praia doTelheiro (SW Portugal). EGU General Assembly 2007. *Geophysical Research Abstracts*, 9: 10894.
- Marques, R., 2004. *Contribuição para o conhecimento da instabilidade geomorfológica nos Açores: Estudo de movimentos de vertente associados a diferentes mecanismos desencadeantes*. Tese de

- Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores.
- Marques, R., Queiroz, G., Coutinho, R., Zêzere, J.L., 2007. Actividade geomorfológica desencadeada pela crise sísmica de 2005 no Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores): avaliação da susceptibilidade com recurso a regressão logística. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 5: 47-61.
- Marques, R., Zêzere, J.L., Gaspar, J.L. and Amaral, P., 2009. Reconstituição e Modelação Probabilística da escoda detrítica de Vila Franca do Campo desencadeada pelo sismo de 22 de Outubro de 1522 (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 4: 175-182.
- Martínez Solares, J.M., 2001. *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Monografía 19, Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Mateos, R.M., Rodríguez-Peces, M.J., Azación, J.M., Rodríguez- Fernández, J., Roldán, F.J., García-Moreno, I., Gelabert, B. y García-Mayordomo, J., 2012. El deslizamiento de Bàltx (Mallorca) y su posible origen sísmico. Procesos activos de expansión lateral desde el Pleistoceno Superior. *Boletín Geológico y Minero*, 124(1): 41-61.
- Mavrouli, O., Corominas, J. y Wartman, J., 2009. Evaluación del peligro de desprendimientos rocosos inducidos por terremotos: El Solà de Santa Coloma, Andorra. En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (eds.): VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Barcelona, II: 675-686.
- Michetti, A.M. and Esposito E., 2007. Environmental Seismic Intensity Scale 2007 – ESI 2007. In: E. Vittori, E. and L. Guerrieri (eds): *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, LXXIV. Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, SystemCart Srl, Roma, Italy, 7-54.
- Moreira de Mendonça, J., 1758. *Historia universal dos terremotos, que tem havido no mundo, de que ha noticia, desde a sua criação até o seculo presente. Com huma narraçam individual do terremoto do 1 de Novembro de 1755, e noticia verdadeira dos seus effeitos em Lisboa, todo Portugal, Algarves e mais partes da Europa*.
- Mulas, J., 1999. *Inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Mula de febrero de 1999*. IGME, Madrid. 2 Mapas. Inédito.
- Mulas, J., Ponce de León, D., Martínez, M. y Pardo, J.M., 2001. Diseño de una metodología para la zonificación de la inestabilidad de laderas naturales producidas por terremotos. Aplicación a una zona del Pirineo Central (Huesca). *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, III: 1241-1252.
- Mulas, J., Ponce de León, D. y Reoyo, E., 2003. Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central. *2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Málaga, 13-26.
- Mulas, J., Ponce de León, D., Pardo Sanjurjo, J.M., Bardasano, L., Prieto Martín, A., Carnicero, C.L. y Herrera, G., 2010. *Microzonación sísmica de las inestabilidades de ladera. Diseño de una metodología y su aplicación a una zona piloto en el Pirineo aragonés (Alto Tena, Huesca)*. Informes Técnicos, nº 2, IGME. CD-Rom.
- Olivera, C., Redondo, E., Lambert, J., Riera Melis, A. y Roca, A., 2006. *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Institut Cartografic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Orueta y Duarte, D., 1885. *Informe sobre los terremotos ocurridos en el sud de España en diciembre de 1884 y enero de 1885*. Imprenta F. Muñoz, Málaga.

- Peláez, J.A., Delgado, J., López-Casado, C., 2005. A preliminary probabilistic seismic hazard assessment in terms of Arias intensity in southeastern Spain. *Engineering Geology*, 77: 139-151.
- Prado, C., 1863. Terremotos en la provincia de Almería. *Escenas Contemporáneas*, 1: 385-386.
- Reichert, K., Michetti A.M. and Silva, P.G., 2009. Palaeoseismology: historical and prehistorical records of earthquake ground effects for seismic hazard assessment. *Soc. Geol. London Spec. Publ.*, 316, 1-10.
- Rodríguez, C.E., Bommer, J.J. and Chandler, R.J., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18: 325-346.
- Rodríguez-Peces, M.J., 2008. *Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: Mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca, Cuenca de Granada y Sierra Nevada*. Tesis de Máster. Universidad de Granada.
- Rodríguez-Peces, M.J., 2010. *Analysis of earthquake-triggered landslides in the South of Iberia: Testing the use of the Newmark's method at different scales*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J., Azañón, J.M. y Jabaloy, A., 2008. Evaluación de inestabilidades de ladera por efecto sísmico en la Cuenca de Lorca (Murcia): Implementación del método de Newmark en un SIG. *Boletín Geológico Minero*, 119(4): 459-472.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J. and Azañón, J.M., 2009a. Comparing Newmark's method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced La Paca rock-fall case (Murcia, SE Spain). *8IWSMRR Workshop Abstract and Short Paper CD, 8th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction*, Aguadulce.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J. and Azañón, J.M., 2009b. Comparación del método de Newmark a escala regional, local y de emplazamiento: el caso del desprendimiento de la Paca (Murcia, SE España). *Geogaceta*, 46: 151-154.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J. y Azañón, J.M., 2009c. Evaluación regional de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos para diferentes escenarios sísmicos en Sierra Nevada (Granada, SE España). En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (eds.): *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Barcelona, II: 687-698.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J., Azañón, J.M., Insua-Arévalo, J.M., Pérez-García, J.L. and Delgado, J., (2009d. Comparación del método de Newmark a Escala regional, Local y de Emplazamiento en las Cuencas de Lorca y de Granada (SE España). En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (eds.): *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Barcelona, II: 699-710.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J., Azañón, J.M. and Jabaloy, A. 2011a. Regional Hazard Assessment of Earthquake-Triggered Slope Instabilities Considering Site Effects and Seismic Scenarios in Lorca Basin (Spain). *Environmental & Engineering Geoscience*, 18(2): 183-196.
- Rodríguez-Peces, M.J., Pérez-García, J.L., García-Mayordomo, J., Azañón, J.M., Insua-Arévalo, J.M. and Delgado, J., 2011b. Applicability of Newmark method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced Bullas and La Paca rock-slide cases (Murcia, SE Spain). *Natural Hazards*, 59: 1109-1124.
- Rodríguez-Peces, M.J., Azañón, J.M., García-Mayordomo, J., Yesares, J., Troncoso, E. and Tsige, M., 2011c. The Diezma landslide (A-92 motorway, Southern Spain): history and potential for future reactivation. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 70: 681-689.
- Rodríguez-Peces, M.J. García-Mayordomo, J., Azañón, J.M., Insua-Arévalo, J.M. and Jiménez Pintor, J. 2011d. Constraining pre-instrumental earthquake parameters from slope stability back-analysis:

- Palaeoseismic reconstruction of the Güevéjar landslide during the 1st November 1755 Lisbon and 25th December 1884 Arenas del Rey earthquakes. *Quaternary International*, 242: 76-89.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J., Martínez-Díaz, J.J., y Tsige, M., 2012. Inestabilidades de ladera provocadas por el terremoto de Lorca de 2011 (Mw 5.1): comparación y revisión de estudios de peligrosidad de movimientos de ladera por efecto sísmico en Murcia. *Boletín Geológico y Minero*, 123(4): 459-472.
- Sanz, E., 1992. El deslizamiento de ladera de Güevéjar (Granada) durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884). *III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 195-203.
- Sanz, E., 1997. Le mouvement de versant de Güevéjar (Grenade) au cours des tremblements de terre de Lisbonne (1755) et d'Andalousie (1884). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 56: 83-87.
- Sanz, E., 2010. El antiguo deslizamiento rocoso del Peñón de Oceanilla (Sierra de Cabrejas, Cordillera Ibérica, Soria). *Geogaceta*, 48: 227-230.
- Silva, P.G., González Hernández, F.M., Goy, J.L., Zazo, C. and Carrasco, P., 2001. Paleo and historical seismicity in Mallorca (Balears, Spain): a preliminary approach. *Acta Geológica Hispánica*, 36(3-4): 245-266.
- Silva, P. G., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Bardají, T., Lario, J., Alfaro, P., Martínez-Díaz, J.J., Reichert, K., Giménez, J., Giner, J., Azañón, J.M., Goy, J.L. y Zazo, C., 2008. Catalogación de los efectos geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos. *Geotemas*, 6: 1063-1066.
- Vaz, T., 2010. *Contribuição para o estudo dos movimentos de vertente desencadeados por eventos sísmicos em Portugal Continental*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Vaz, T. and Zêzere, J.L., 2011. Landslides induced by seismic events in Portugal mainland: identification and characterization. *Geophysical Research Abstracts*, 13: EGU2011-4802.
- Vidal, F. (1986). *Sismotectónica de la región Béticas-Mar de Alborán*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Vilanova, S.P. and Fonseca, J., 2004. A falha do Vale Inferior do Tejo na análise da perigosidade sísmica. *Sísmica 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, pp. 379-388.
- Vollmert, A., Reichert, K., Silva, P.G. and Fernandez-Steege, T.M., 2011. Landslide mapping to analyse earthquake environmental effects (EEE) in Carmona, Spain – relation to the 1504 event? *2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*, Corinth.
- Zêzere, J.L., Ferreira, A.B., Rodrigues, M.L., 2001. Actividade sísmica e instabilidade de vertentes na cidade de Lisboa. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Madrid, III: 253-1264.